





(84) **Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

---

(57) **Zusammenfassung:** Die Erfindung betrifft ein Halbleiterbauelement mit einem temporär vergrabenen temporär n-dotierten Bereich (9), der nur beim Abschalten vom leitenden in den sperrenden Zustand des Halbleiterbauelementes wirksam ist und ein Abreißen des Tailstromes verhindert, um so die Weichheit des Abschaltens zu verbessern. Dieser temporär wirksame Bereich wird durch Implantation von K-Zentren (Z) geschaffen.

-1-

## Beschreibung

Halbleiterbauelement mit temporärem Feldstoppbereich und  
5 Verfahren zu dessen Herstellung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Halbleiterbauelement mit einem Halbleiterkörper und wenigstens zwei Elektroden, zwischen denen sich im Halbleiterkörper mindestens ein pn-  
10 Übergang und ein Spannung aufnehmendes Gebiet des einen Leitungstyps, in welchem sich eine Raumladungszone ausbreitet, wenn an die Elektroden eine den pn-Übergang in dessen Sperrrichtung beaufschlagende Spannung angelegt ist, befinden. Zwischen dem Spannung aufnehmenden Gebiet und der  
15 Elektrode für dieses Gebiet kann eine höher als dieses Gebiet dotierte Zone des einen Leitungstyps vorgesehen sein. Außerdem bezieht sich die vorliegende Erfindung auf ein Verfahren zur Herstellung eines solchen Halbleiterbauelements.

20 Beim Abschalten eines Halbleiterbauelementes von dessen leitenden in dessen sperrenden Zustand bildet sich bekanntlich zunächst ausgehend von dem in Sperrrichtung gepolten pn-Übergang eine Raumladungszone aus, in welcher die  
25 am Halbleiterbauelement anliegende Spannung aufgenommen wird. Handelt es sich bei dem Halbleiterbauelement beispielsweise um eine Diode, so breitet sich die Raumladungszone ausgehend vom pn-Übergang der Diode in Richtung auf die Kathode aus. Im "hinteren Teil" der Diode, also im Bereich vor der Kathode  
30 steht dann zunächst noch ein Teil der ursprünglich gespeicherten Ladung an, die aber mit der zunehmenden Ausbreitung der Raumladungszone in der Folgezeit abgebaut wird. Während dieser Folgezeit, während der sich die Raumladungszone weiter ausbreitet, fließt ein so genannter  
35 "Tailstrom", der erst dann abreißt, wenn die Raumladungszone an der der Kathode vorgelagerten hochdotierten Zone, also an einem  $nn^+$ -Übergang ankommt. Stößt nun die Raumladungszone an

-2-

diesem  $nn^+$ -Übergang an, so führt dies zu einem Abriss des Tailstroms. Dieser plötzliche Stromabriss hat Spannungsüberhöhungen aufgrund der im Stromkreis vorhandenen Induktivität und Oszillationen zur Folge.

5

Ein Beispiel hierfür ist in Fig. 6 für eine 3,3 kV-Diode gezeigt. Zu einem Zeitpunkt von ungefähr  $t = 3E-6$  s nach dem Abschalten der Diode reißt der Tailstrom  $i_T$  ab, was Oszillationen des insgesamt noch zwischen Anode und Kathode fließenden Stromes  $i$  (A) zur Folge hat. Dieser Abriss des Tailstroms erzeugt wegen der hohen  $di/dt$ -Steilheit auch Spannungsspitzen, welche äußerst unerwünscht sind, da sie zu der Zerstörung des Bauelements führen können. Es gilt daher, Stromabrisse infolge des Anstoßens der Raumladungszone an  $nn^+$ -Übergängen beim Abschalten eines Halbleiterbauelementes

10  
15

möglichst zu vermeiden.

Der obige Sachverhalt und im Hinblick auf diesen Sachverhalt bisher unternommene Maßnahmen sollen im Folgenden anhand der Fig. 7A und 7B erläutert werden, in denen der Dotierungsverlauf für Akzeptoren  $N_A$  bzw. für Donatoren  $N_D$  in Volllinien und der aus diesem Dotierungsverlauf resultierende Verlauf des elektrischen Feldes  $E$  in Strichlinien in Abhängigkeit von der Tiefe  $w$  des Halbleiterbauelements aufgetragen sind. Für das elektrische Feld  $E$  wird dabei zwischen einem statischen Feld  $E(\text{stat})$  und einem insbesondere beim Abschalten der Polarität auftretenden dynamischen Fall  $E(\text{dyn})$  unterschieden. Die Weite bzw. Tiefe der schwach dotierten Basiszone, die im Wesentlichen die Spannung aufnimmt, ist mit  $w_B$  angegeben. Die höchste Feldstärke, die im statischen Fall erreicht wird, beträgt  $E_c$ .

20  
25  
30

Aus der Fig. 7A sind die p-Dotierung der Anodenzone, die  $n^-$ -Dotierung des die Spannung aufnehmenden Gebietes und die  $n^+$ -Dotierung der hochleitenden Zone vor der Kathode zu ersehen. Die Kurve  $E(\text{dyn})$  gibt nun die Situation an, in welcher beim Abschalten des Bauelementes die Raumladungszone an der

35

-3-

hochdotierten  $n^+$ -Zone anstößt. Bei diesem Anstoßen tritt der in Fig. 6 gezeigte Abriss des Rückstromes auf. Die Kurve  $E(\text{stat})$  für den statischen Fall liegt erheblich höher, da hier die anhand der Fig. 6 erläuterten Erscheinungen nicht auftreten.

Die jeweils im statischen Fall und dynamischen Fall aufnehmbaren Spannungen entsprechen den Flächen unterhalb den Kurven  $E(\text{stat})$  bzw.  $E(\text{dyn})$ , also der über der Weite  $w$  integrierten Feldstärke  $E(w)$ .

Zusammenfassend ergibt sich also, dass ein Bauelement mit dem in Fig. 7A gezeigten Dotierungsverlauf eine relativ hohe statische Sperrfähigkeit und eine relativ niedrige dynamische Sperrfähigkeit hat, wobei die dynamische Sperrfähigkeit die Spannung ist, bei der ein Rückstromabriss auftritt.

Eine Möglichkeit zur Steigerung der dynamischen Sperrfähigkeit könnte nun darin bestehen, die Weite des die Spannung aufnehmenden Gebietes, also die Weite  $w_B$  des  $n^-$ -dotierten Gebietes, so groß zu gestalten, dass das elektrische Feld bei der obersten Spannung, gegen die das Bauelement kommutiert wird, den  $nn^+$ -Übergang, also die Weite  $w_B$ , nicht erreicht. Bei hochsperrenden Bauelementen für einen Einsatzbereich über 2 kV muss aber die Dotierung derart niedrig gewählt werden, dass eine ausreichende Stabilität gegen Höhenstrahlung erreicht wird. Eine so niedrige Dotierung lässt aber den Gradienten des elektrischen Feldes klein werden und führt zu einer großen Ausdehnung der Raumladungszone. Außerdem führt eine große Weite des die Spannung aufnehmenden Gebietes, auch Mittelzone genannt, zu hohen Durchlass- und/oder Schaltverlusten. Diese Durchlass- und/oder Schaltverluste nehmen dabei etwa proportional zur Größe von  $w_B$  zu. Es ist also nicht möglich, für die Weite  $w_B$  die unter Gesichtspunkten der Sperrfähigkeit geeignetsten Werte zu wählen.

Bekanntlich gibt es IGBTs oder Thyristoren, die vor einer p-leitenden Kollektorzone bzw. anodenseitigen Emitterzone eine höher n-dotierte Schicht als einen so genannten Feldstoppbereich bzw. "Buffer" haben. Ein solcher

5 Feldstoppbereich kann mit Protonenbestrahlung von der Kollektor- bzw. Anodenseite und anschließender Ausheilung erzeugt werden (vgl. hierzu "13 kV Rectifiers: Studies on Diodes and Asymmetric Thyristors", Proceedings ISPSD 2003, S. 122-125).

10 Die bei einem Bauelement mit einer solchen Feldstoppzone vorliegende Situation ist für den Fall einer Diode in Fig. 7B veranschaulicht. Wie nun dieser Fig. 7B zu entnehmen ist, führt die Feldstoppzone aufgrund ihrer erhöhten Dotierung zu  
15 einem höheren Gradienten der elektrischen Feldstärke  $E$ . Damit wird die Fläche unterhalb der Kurve  $E(\text{dyn})$  erheblich größer als bei einem Bauelement ohne Feldstoppzone. Das heißt, die Raumladungszone stößt erst bei einer höheren Spannung oder -  
für den Fall, dass die Feldstoppzone ausreichend hoch dotiert  
20 ist- gar nicht am  $nn^+$ -Übergang an. Im dynamischen Fall kann also das so gestaltete Halbleiterbauelement höhere Spannungen sperren.

Ein Nachteil einer Feldstoppzone, deren Tiefe in Fig. 7B mit  
25  $w_{\text{Buf}}$  angegeben ist, liegt darin, dass die Fläche unterhalb der Kurve  $E(\text{stat})$  deutlich kleiner ist als im Fall eines Halbleiterbauelementes ohne Feldstoppzone entsprechend Fig. 7A, denn die Zone hinter der Feldstoppzone bzw. zwischen diesem und der hochdotierten  $n^+$ -Zone, kann kaum bzw. gar  
30 nicht zur Aufnahme des elektrischen Feldes beitragen.

Wünschenswert wäre an sich ein Halbleiterbauelement, bei welchem im dynamischen Fall eine Kurve  $E(\text{dyn})$  entsprechend Fig. 7B gilt, während im statischen Fall der Verlauf der  
35 Kurve von  $E(\text{stat})$  von Fig. 7A erhalten bleibt. Diese Bedingung wird von den vorhandenen Halbleiterbauelementen offenbar nicht erfüllt.

Bei der Bestrahlung von einem Siliziumkörper mit hochenergetischen Elektronen oder mit  $H^+$ - oder  $He^{++}$ -Atomkernen (Ionen) entstehen im Silizium eine Reihe von verschiedenen Zentren Z im Bereich zwischen dem Valenzband V und dem Leitungsband L von Silizium, wie dies in Fig. 8 schematisch veranschaulicht ist. Einige dieser Zentren werden als Rekombinationszentren benutzt. Bei der Bestrahlung mit  $H^+$ -Ionen, also bei Protonenbestrahlung, entsteht auch ein Zentrum, das als fester Donator wirkt und beispielsweise zur Erzeugung einer Feldstoppzone, wie für die Feldstoppzone "Buffer" in Fig. 7B, verwendet werden kann.

Abgesehen von dem der Protonenbestrahlung zugeordneten festen Donator entstehen bei der Bestrahlung mit z. B. Protonen,  $He^{++}$ -Kernen, Kohlenstoffatomen oder Elektronen und anschließender Ausheilung bei einer Temperatur über  $220^\circ C$  speziell die in Fig. 8 gezeigten Zentren Z, nämlich Doppelleerstellen VV bzw. E (230 K) bei  $-0,24$  eV,  $-0,43$  eV und  $+0,19$  eV und ein Zentrum aus einer Assoziation eines Sauerstoffatoms mit einer Leerstelle, nämlich ein Zentrum OV bzw. E (90 K) bei einem Energieniveau von  $-0,17$  eV, wobei diese Zentren als Rekombinationszentren wirken.

Bei allen Arten einer Bestrahlung mit einem anschließenden Ausheilprozess, also bei Bestrahlung mit hochenergetischen Elektronen, mit  $H^+$ -,  $He^{++}$ -Kernen oder Kohlenstoffionen entsteht auch das so genannte K-Zentrum (COVV), das als eine Assoziation eines Kohlenstoffatoms, eines Sauerstoffatoms und zweier Leerstellen beschrieben ist. Als Rekombinationszentrum ist dieses Zentrum nur sehr schwach wirksam. Es liegt bei einem Energieniveau von  $+0,355$  eV und wird auch mit H (195 K) bezeichnet.

Das K-Zentrum COVV wurde bisher vor allem wegen seiner störenden Eigenschaften bekannt. So wird beispielsweise in der DE 197 09 652 A1 berichtet, dass nach einer

-6-

Elektronenbestrahlung eine homogene Verteilung an K-Zentren entsteht. Diese K-Zentren wirken als temporärer Donator: unmittelbar nach Stromfluss sind sie positiv geladen. Dieser Ladungszustand hält temperaturabhängig einige 100 ns bis  
5 einige  $\mu$ s an. Zu dieser Zeit, in welcher die K-Zentren wirksam sind, ist die effektive Grunddotierung des mit ihnen dotierten Halbleiterkörpers temporär angehoben. Infolge einer solchen erhöhten Grunddotierung geht ein Halbleiterbauelement weit unterhalb seiner statischen Sperrspannung in einen  
10 Lawinendurchbruch über. Durch einen solchen wird eine hochfrequente Oszillation, die dynamische IMPATT-Schwingung, ausgelöst. Diese IMPATT-Schwingung verschwindet nach einigen wenigen Mikrosekunden, wobei das Halbleiterbauelement aber in der Regel nicht zerstört wird.

15 Aufgrund der starken elektromagnetischen Störabstrahlung muss eine IMPATT-Schwingung unbedingt vermieden werden. Aus diesem Grund wird bei der in der DE 197 09 652 A1 beschriebenen Leitungsdiode die zulässige Anzahl an K-Zentren begrenzt.  
20 Damit kann eine Elektronenbestrahlung angewandt werden, ohne störende Oszillationen hervorzurufen.

In der Veröffentlichung "Analysis of Dynamic Impatt Oscillations caused by Radiation Induced Deep Centers",  
25 Proceedings ISPSD 2003, wird erläutert, wie die dotierende Wirkung von K-Zentren durch die Erzeugung eines lokalen Profils an Störstellen bei der Implantation von  $\text{He}^{++}$ -Kernen nachgewiesen werden kann. Dabei werden ebenfalls die störenden IMPATT-Oszillationen herangezogen. Fig. 9 zeigt ein  
30 Profil der verschiedenen Zentren nach einer Helium-Implantation und einer Ausheilung im Bereich von  $350^\circ\text{C}$ . Deutlich ist aus der Fig. 9 zu ersehen, dass die COVV-Zentren die OV-Zentren und die VV-Zentren in der Konzentration  $\text{K} (\text{cm}^{-3})$  überragen.

35 In obiger Veröffentlichung erfolgt die Implantation der  $\text{He}^{++}$ -Kerne von der Anodenseite aus. Auf der Abszisse von Fig. 9



-7-

ist daher die Entfernung von der Anode aufgetragen. Auch in dieser Veröffentlichung wird aber auf den störenden Einfluss der K-Zentren verwiesen, die möglichst vermieden werden sollten.

5

Durch den Stand der Technik erhält der Fachmann somit die klare Anweisung, dass in Halbleiterbauelementen das Auftreten von K-Zentren wegen ihres störenden Einflusses möglichst verhindert werden sollte.

10

Es ist Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Halbleiterbauelement zu schaffen, das sich durch eine hohe statische Sperrspannung auszeichnet, jedoch einen Feldstoppbereich aufweist, der bei Aufnahme der Sperrspannung nach einer Kommutierung eine Ausbreitung der Raumladungszone kurzzeitig bremst, deren Anstoßen an einem  $nn^+$ - (bzw.  $pp^+$ )-Übergang verzögert, während der Tailphase die Injektion von Löchern in die Basiszone aufrecht erhält und somit ein sanftes Abschalten ermöglicht, so dass störende Oszillationen beim Abschalten ohne gleichzeitige Herabsetzung der statischen Sperrfähigkeit vermieden werden.

15

20

Diese Aufgabe wird bei einem Halbleiterbauelement der eingangs genannten Art erfindungsgemäß dadurch gelöst, dass in dem Spannung aufnehmenden Gebiet vor einem Übergang zu der höher dotierten Zone ein temporär wirksamer Bereich des einen Leitungstyps vorgesehen ist, der zwischen seinem Leitungsband und seinem Valenzband Zentren aufweist, die bei einer Überschwemmung des Spannung aufnehmenden Gebiets freie Ladungsträger einfangen können, sich bei einer Ausbreitung der Raumladungszone aber wieder entladen, so dass der Bereich nur bei einem Abschaltvorgang nach der Überschwemmung mit freien Ladungsträgern zeitweise wirksam ist. Der temporär wirksame Bereich bildet vorzugsweise einen temporären Feldstoppbereich vor der höher dotierten Zone.

25

30

35

-8-

Vorzugsweise ist der eine Leitungstyp der n-Leitungstyp, und als Zentren werden insbesondere K-Zentren eingesetzt.

Der temporäre Feldstoppbereich ist also nur im Falle eines Schaltvorgangs wirksam, wenn das Halbleiterbauelement zuvor  
5 mit Ladungsträgern geflutet war. Im stationären Fall ist dagegen der Feldstoppbereich wieder verschwunden.

Um einen derartigen Feldstoppbereich zu ermöglichen, nutzt die vorliegende Erfindung in vorteilhafter Weise die bisher  
10 als unerwünscht angesehenen K-Zentren aus. Diese haben nämlich den Charakter eines Donators, der während der Phase der Überschwemmung positiv geladen ist. Bei Ausbildung einer Raumladungszone nach einer Kommutierung entlädt er sich über  
15 einen gewissen Zeitraum wieder, so dass im statischen Fall eine hohe Sperrfähigkeit gewährleistet bleibt.

Die Erfindung nutzt also einen Effekt, der in der Fachliteratur bisher als nachteilhaft beschrieben ist, für die Erzeugung einer positiven Wirkung, nämlich für die  
20 Bildung eines temporären Feldstoppbereiches.

Bei dem erfindungsgemäßen Halbleiterbauelement werden damit die bisher als störend beschriebenen Eigenschaften der K-Zentren als Maßnahme zu deren Verbesserung eingesetzt: die K-  
25 Zentren werden nämlich derart angeordnet, dass sie als temporäre Feldstoppbereich ein Anstoßen des elektrischen Feldes an der hochdotierten Zone bei Kommutierung verzögern.

Wie bereits oben erläutert wurde, ist ein wesentliches  
30 Hindernis für den Einsatz der K-Zentren für positive Eigenschaften von Halbleiterbauelementen deren Ladung und deren Entladung, welche mit einer stark temperaturabhängigen Zeitkonstanten erfolgt.

35 Die Temperaturabhängigkeit der Besetzung der Zentren, nämlich die Ermittlung des Anteils der Zentren, die positiv geladen sind, errechnet sich nach der folgenden Gleichung:

-9-

$$N_{TD+} = N_{TD} \frac{e_n + p \cdot c_p}{e_n + e_p + n \cdot c_n + p \cdot c_p} \quad (1)$$

mit  $N_{TD}$  = Anzahl der K-Zentren,  $N_{TD+}$  = Anzahl der positiv  
 5 geladenen K-Zentren,  $e_p$  = Emissionsrate von positiv geladenen  
 Zentren,  $e_n$  = Emissionsrate von negativ geladenen Zentren,  $c_p$   
 = Einfangkoeffizient von positiv geladenen Zentren,  $c_n$  =  
 Einfangkoeffizient von negativ geladenen Zentren,  $p$  = Anzahl  
 freier positiver Ladungsträger und  $n$  = Anzahl freier  
 10 negativer Ladungsträger.

Bei dem im Durchlasszustand vorliegenden Fall einer hohen  
 Injektion kann  $n = p$  angenommen werden, wobei jeweils gilt

$$15 \quad n = p = 1 \text{ E } 16 \text{ cm}^{-3}.$$

Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Besetzung errechnet  
 sich sodann mit Hilfe von Gleichung (1) für

$$20 \quad \begin{aligned} T = 300^\circ\text{K}: N_{TD+} &\approx 0,92 N_{TD} \\ T = 400^\circ\text{K}: N_{TD+} &\approx 0,83 N_{TD} \end{aligned}$$

Dies bedeutet, dass auch im Bereich von höheren  
 Betriebstemperaturen ausreichend K-Zentren positiv geladen  
 25 sind. Nach Ende der Bedingung einer hohen Injektion, also  
 nach Beendigung der Ladungsträgerüberschwemmung, entladen  
 sich die Zentren, wobei sich die Zeitkonstante  $\tau_{ep}$  nach der  
 folgenden Gleichung bestimmt:

$$30 \quad \frac{1}{\tau_{ep}} = A_h \cdot T^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_T - E_V}{k \cdot T}\right) \quad (2)$$

Dabei bedeuten  $A_h$  den mit Hilfe von DLTS-Messungen (DLTS =  
 Deep Level Transienten Kapazitäts-Spektroskopie) bestimmten  
 Arrheniusfaktor,  $E_T$  das Energieniveau des K-Zentrums,  $E_V$  das

-10-

Energieniveau des oberen Randes des Valenzbandes,  $k$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die absolute Temperatur.

Aus der Gleichung (2) ergibt sich damit:

$$\begin{aligned} \tau_{ep} (300^\circ\text{K}) &\approx 6 \mu\text{s} \\ \tau_{ep} (400^\circ\text{K}) &\approx 0,1 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Die Zeitkonstante  $\tau_{ep}$  ist bei  $400^\circ\text{K}$  wesentlich kleiner als bei  $300^\circ\text{K}$  und sehr schnell. Es ist nun aber ohne weiteres möglich, die Feldstoppschicht aus K-Zentren so anzuordnen, dass in ihr noch lange während eines Abschaltvorganges die Bedingung einer hohen Injektion vorliegt. Dazu wird sie in der noch von Ladungsträgern gefluteten Zone in dem Bereich des Spannung aufnehmenden und niedrig dotierten Gebiets vorgesehen, der dicht an der hochdotierten Zone liegt. Dort ist nämlich die Konzentration an freien Ladungsträgern  $n$  bzw.  $p$  nach einem Abschaltvorgang immer noch im Bereich von  $1 \text{ E } 16 \text{ cm}^{-3}$ . Damit ist dort auch noch während der Phase der Spannungsaufnahme, in welcher sich die Raumladungszone ausbreitet, die Bedingung einer hohen Injektion gegeben.

Vorzugsweise wird so der temporäre Feldstoppbereich in einer Tiefe von  $0,75 w_B$  bis  $0,95 w_B$  von pn-Übergang angeordnet, wobei  $w_B$  den Abstand zwischen dem pn-Übergang und der höher dotierten Zone des einen Leitungstyps bedeutet.

Die Höhe der Dotierungskonzentration im Feldstoppbereich beträgt wenigstens  $1 \text{ E } 14 \text{ cm}^{-3}$  und höchstens  $5 \text{ E } 15 \text{ cm}^{-3}$ . Die obere Grenze dieser Dotierung des Feldstoppbereiches ist dadurch gegeben, dass auch bei etwa  $-40^\circ\text{C}$  keine dynamische IMPATT-Schwingung einsetzen darf.

Wesentlich an der vorliegenden Erfindung ist die Realisierung tiefer vergrabener, vorzugsweise n-dotierter Bereiche oder Schichten, die nur temporär wirksam sind, mit Hilfe der Erzeugung von Störstellen, die geeignete Energieniveaus in der Bandlücke zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband

-11-

aufweisen. Solche Bereiche oder Schichten mit temporär wirksamen Störstellen liegen insbesondere im Fall einer Diode kurz vor vorzugsweise einem  $nn^+$ -Übergang und weisen dort tiefe Störstellen mit einer Dotierung von  $1 \text{ E } 14 \text{ cm}^{-3}$  bis  $5 \text{ E } 15 \text{ cm}^{-3}$ , vorzugsweise  $2 \text{ E } 15 \text{ cm}^{-3}$  auf. Diese Störstellen haben den Charakter von Donatoren, die während der Phase der Überschwemmung nach einem Abschaltvorgang positiv geladen sind und sich bei Ausbildung einer Raumladungszone wieder entladen. Die sich entladenden Löcher der Feldstoppzone und auch die im Bereich zwischen der Feldstoppzone und dem  $nn^+$ -Übergang gespeicherten Ladungsträger erhöhen während des Entladevorgangs den durch das Bauelement fließenden Strom und machen somit das Abschalten weicher; d. h. ein Abreißen des Stroms kann somit verhindert werden.

Das erfindungsgemäße Halbleiterbauelement kann vorzugsweise eine Diode, ein IGBT (Bipolartransistor mit isoliertem Gate) oder ein Thyristor sein. Bei den beiden letztgenannten Bauelementen kann die temporäre Feldstoppzone einem p-Emitter vorgelagert sein, wobei eine zusätzliche, sich möglichst dicht am p-Emitter befindliche stationäre Feldstoppzone, die mittels der üblichen Dotierstoffe, wie z. B. Phosphor, erzeugt wird, zur weiteren Optimierung der elektrischen Eigenschaften dieser beiden Bauelemente beitragen kann.

Das erfindungsgemäße Halbleiterbauelement kann auch ein Leistungs-MOS-Transistor sein. Dieser kann, was auch für die anderen Bauelemente gilt, in Kompensationstechnik ausgeführt sein, so dass beispielsweise ein CoolMOS-Bauelement vorliegt.

Es ist - wie bereits erwähnt - ohne weiteres möglich, die temporäre Feldstoppzone mit anderen üblichen Feldstoppkonzepten zu kombinieren, was vorzugsweise bei einem IGBT oder einem asymmetrischen Thyristor vorteilhaft ist.

Wird eine Protonenbestrahlung zur Erzeugung der Zentren angewandt, so kann bei geeigneter Temperatur und Dosis durch einen Bestrahlungsschritt eine Kombination eines temporären

-12-

Feldstoppbereiches, der durch K-Zentren induziert ist, und aus einem stationären Feldstoppbereich, der durch die mit Wasserstoff erzeugten Zentren induziert ist, realisiert werden.

5

Anstelle der vorzugsweise verwendeten K-Zentren können auch andere Zentren, die vergleichbare Eigenschaften wie das K-Zentrum haben, angewandt werden. Diese Zentren können z. B. durch eine Bestrahlung mit hochenergetischen Teilchen erzeugt werden, wofür sich beispielsweise Heliumionen, Protonen, Kohlenstoffatome und Elektronen besonders eignen. Zur Realisierung von relativ hohen Konzentrationen an K-Zentren bietet es sich an, für das Grundmaterial des Halbleiterkörpers eine nicht zu niedrige Kohlenstoffkonzentration vorzusehen, bzw. diese bei der Verwendung einer Kohlenstoffimplantation zur Erzeugung der K-Zentren direkt einzubringen.

10

15

20

25

30

35

Handelt es sich bei dem erfindungsgemäßen Halbleiterbauelement um eine Diode, so sollte die Bestrahlung zur Erzeugung der Zentren vorzugsweise von der Kathodenseite, also durch einen n-leitenden Emitter hindurch, erfolgen. Entsprechend sollte bei einem IGBT die Bestrahlung von der Kollektorseite aus, also durch einen p-leitenden Emitter hindurch, vorgenommen werden. Dadurch kann die Bildung der Zentren über die Tiefe des Spannung aufnehmenden Gebietes vermieden werden. Im durchstrahlten Bereich werden Zentren lediglich in relativ geringer Konzentration gebildet. Auch kann auf diese Weise insbesondere bei hochsperrenden Bauelementen eine zu hohe Implantationsenergie umgangen werden. Sind die benötigte Implantationsdosis und Implantationsenergie aber nicht zu hoch, so kann die Bestrahlung auch von der anderen Seite des Bauelementes, also von der Anodenseite bei einer Diode und von der Emitterseite bei einem IGBT, durchgeführt werden.

-13-

Schließlich ist es auch zweckmäßig, gegebenenfalls eine Mehrfachimplantation mit verschiedenen Energien vorzunehmen, um so zwei oder mehrere temporäre Feldstoppbereiche zu bilden. Ebenso ist es möglich, einen verbreiterten temporären Feldstoppbereich dadurch zu erzeugen, dass durch eine Metallfolie, die eine geeignete Dicke hat, der Halbleiterkörper mit einer höheren Energie bestrahlt wird, um somit bei gleicher Eindringtiefe in den Halbleiterkörper einen verbreiterten Feldstoppbereich zu realisieren.

Vorzugsweise weist bei dem erfindungsgemäßen Halbleiterbauelement das durch Bestrahlung erzeugte Zentrum den Charakter eines Donators auf und ist in einem n<sup>-</sup>-leitendem Gebiet gelegen. Die Erfindung ist aber nicht hierauf beschränkt. Vielmehr kann sie auch auf ein Halbleiterbauelement angewandt werden, bei dem ein solches Zentrum einen Akzeptor bildet, der in einem p-leitenden Gebiet gelegen ist.

Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Zeichnungen näher erläutert. Es zeigen:

Fig. 1A ein Schnittbild einer Diode als einem Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Halbleiterbauelementes,

Fig. 1B eine schematische Darstellung für den Verlauf der Dotierungskonzentration und des elektrischen Feldes bei der Diode von Fig. 1A,

Fig. 2 den Verlauf der Entladung einer Feldstoppzone bei einer Temperatur von 400°K,

Fig. 3 die Abhängigkeit der Konzentration verschiedener Zentren von der Ausheiltemperatur,

-14-

Fig. 4 das gemessene Recovery-Verhalten einer Diode mit K-Zentren,

Fig. 5 den Verlauf der Entladung eines K-Zentrums bei einer Temperatur von 300°K,

Fig. 6 den Verlauf des Tailstromes bei einer Diode nach dem Stand der Technik,

Fig. 7A den Verlauf der Dotierungskonzentration und des elektrischen Feldes bei einer Diode ohne Feldstoppbereich,

Fig. 7B den Verlauf der Dotierungskonzentration und des elektrischen Feldes bei einer Diode mit Feldstoppbereich,

Fig. 8 ein Banddiagramm mit verschiedenen Zentren für mit He<sup>++</sup>-Kernen und Elektronen bestrahltes Silizium und

Fig. 9 den Verlauf des Konzentrationsprofils für verschiedene Zentren nach einer Helium-Implantation und Ausheilung im Bereich von 350°C.

Die Fig. 6 bis 9 sind bereits eingangs erläutert worden. In den Figuren werden für einander entsprechende Bauteile jeweils die gleichen Bezugszeichen verwendet.

Fig. 1A zeigt einen Siliziumkörper 1, der eine nicht zu niedrige Konzentration an Kohlenstoff aufweist und mit einer ersten Elektrode (Anode A) 2 und einer zweiten Elektrode (Kathode K) 3 auf seinen beiden, einander gegenüberliegenden Hauptoberflächen versehen ist. In diesem Siliziumkörper 1 sind eine p-leitende Zone (Anodenzone) 12, ein schwach n<sup>-</sup>-leitendes Gebiet 5, das mit der Zone 12 einen pn-Übergang 4 bildet, eine hochdotierte n<sup>+</sup>-leitende Zone 7, die mit dem



-15-

Gebiet 5 einen  $nn^+$ -Übergang 8 bildet, und - erfindungsgemäß - ein temporärer Feldstoppbereich 9 vorgesehen. Gegebenenfalls können auch mehrere solche Feldstoppbereiche 9, 9', ... angewandt werden.

5

Außerdem sind in Fig. 1A noch schematisch optional vorhandene, p-leitende Kompensationsgebiete 10 angedeutet, die in dem Gebiet 5 gelegen sind und dort für Ladungskompensation sorgen.

10

Abhängig von der zwischen den Elektroden 2, 3 liegenden Sperrspannung breitet sich eine Raumladungszone 6 aus, deren Grenze in Fig. 1A schematisch angedeutet ist. Die Ausdehnung dieser Raumladungszone 6 hängt von der zwischen den Elektroden 2 und 3 liegenden Spannung ab.

15

Fig. 1B zeigt ähnlich wie die Fig. 7A und 7B den Verlauf der Dotierungskonzentration und des elektrischen Feldes für die in Fig. 1A schematisch veranschaulichte Diode (ohne Kompensationsgebiete und ohne zusätzlichen Feldstoppbereich 9'). Zusätzlich ist in Fig. 1B noch die Lage eines herkömmlichen stationären Feldstoppbereiches 11 angedeutet (dieser ist in Fig. 1A nicht gezeigt).

20

Der temporäre Feldstoppbereich 9 liegt vorzugsweise bei 0,75  $w_B$  bis 0,95  $w_B$ , wie dies in den Fig. 1A und 1B angedeutet ist. In diesem Bereich ist bei Abschaltung der Diode ein Ladungsträgerberg 13 vorhanden, so dass die für die Ausbildung des temporären Feldstoppbereiches 9 notwendige Ladungsträgerüberschwemmung gewährleistet ist. Das elektrische Feld  $E$  steigt linear von diesem Ladungsträgerberg 13 aus an, um am pn-Übergang 4 seinen Höchstwert zu erreichen.

30

Nachdem die Raumladungszone (vgl. Strichpunktlinie 6 in Fig. 1A) die Feldstoppzone 9 erreicht hat, also kurz nach dem in den Fig. 1A und 1B veranschaulichten Zustand, beginnt die

35

Feldstoppzone, sich zu entladen. Dieser Vorgang ist in Fig. 5 veranschaulicht, wobei hier die Zeit  $t = 0$  der Zeitpunkt ist, an welchem die Raumladungszone 6 beginnt, in den Feldstoppbereich 9 einzudringen. Die

5 Ladungsträgerkonzentration  $N_D^+$  ist in Fig. 5 für den Zeitpunkt  $t = 0$ ,  $t = 700$  ns und  $t = 3$   $\mu$ s gezeigt. Aus der Fig. 5 folgt deutlich, dass nach Eindringen der Raumladungszone 6 in den Feldstoppbereich 9 dessen Ladung mit einer gewissen Zeitkonstanten abgebaut wird, so dass dieser  
10 Feldstoppbereich tatsächlich eine temporäre Wirkung entfaltet.

Fig. 2 zeigt den Verlauf der Entladung des Feldstoppbereichs 9 bei einer Temperatur von 400°K. Die Darstellung ist dabei  
15 in logarithmischem Maßstab gegeben. Es ist aus dieser Fig. 2 zu ersehen, dass nach einer Zeit  $t = 300$  ns die Ladungsträgerkonzentration  $N_{TD+}$ , also die Konzentration an besetzten Zentren, um mehr als eine Größenordnung abgenommen hat.

20

Für die Anwendung der Erfindung bei einem Halbleiterbauelement ist dabei zu beachten, dass der Feldstoppbereich 9 nur für eine relativ kurze Zeit, nämlich für den Zeitraum des Abreißen des Teilstroms (vgl. Fig. 6) benötigt wird. Die bei und nach der Entladung des  
25 Feldstoppbereichs 9 fließenden Ladungsträger vermeiden den Abriss des Teilstromes, indem sie den Strom durch die zwischen dem Feldstoppbereich 9 und der n-dotierten Kathodenzone bei einer Diode bzw. dem p-dotierten Emitter bei  
30 einem IGBT gespeicherten Ladungsträger und auch durch die in der temporären Feldstoppzone selbst entladenen Löcher erhöhen.

Die Anwesenheit von Rekombinationszentren in dem  
35 Feldstoppbereich 9, insbesondere des OV-Zentrums, kann bei bestimmten Bauelementen von Vorteil sein. Dies ist insbesondere bei IGBTs mit einem Feldstoppbereich der Fall.

-17-

Bei schnellen Dioden ist die Anordnung von solchen Rekombinationszentren an dieser Stelle jedoch in der Regel nicht zweckmäßig. Allerdings ist es möglich, durch geeignetes Tempern die Zusammensetzung der Zentren zu verändern.

5

Hierfür zeigt Fig. 3 ein Beispiel. Fig. 3 ist nach Daten aus W. Wondrak, Dissertation, Frankfurt, 1985, zusammengestellt. Dabei werden die Signale H(190K) und H(210K) unterschieden, es werden jedoch beide dem K-Zentrum zugeordnet. Fig. 3 zeigt, dass das K-Zentrum COVV gegenüber Tempern sehr stabil ist, während das starke Rekombinationszentrum OV bei Temperaturen  $>400^{\circ}\text{C}$  verschwindet. Somit findet sich  $>420^{\circ}\text{C}$  ein Fenster, in dem das K-Zentrum vorherrscht und die Wirkung der strahlungsinduzierten Zentren als Rekombinationszentren weitgehend erloschen ist. Für die Einstellung des Schaltverhaltens einer Diode wird bevorzugt dieser Bereich gewählt.

10

15

20

25

30

Fig. 4 veranschaulicht das gemessene Recovery-Verhalten einer Diode mit K-Zentren im Feldstoppbereich 9, also im hinteren Teil des niedrig dotierten Gebietes 5. Hier sind diese K-Zentren durch  $\text{He}^{++}$ -Implantation erzeugt. Nach ungefähr 300 ns zeigt der Tailstrom  $I_T$  (vgl. die Stelle "A\*") einen zusätzlichen Stromanstieg. In diesem Zeitpunkt erreicht das elektrische Feld die temporäre Feldstoppzone 9. Wird Fig. 4 mit Fig. 6 verglichen, kann man sich veranschaulichen, dass aus dem Feldstoppbereich 9 und der sich zwischen der höher dotierten Zone 7 und der Zone 9 befindlichen, bis zum Zeitpunkt der Entladung der Zone 9 mit freien Ladungsträgern überschwemmten Zone genau der Strom gewonnen werden kann, der im herkömmlichen Halbleiterbauelement gemäß Fig. 6 am Ende des Tailstromes  $I_T$  fehlt.

35

Das erfindungsgemäße Halbleiterbauelement wird anhand einer Vertikalstruktur erläutert. Es kann aber ohne weiteres auch eine Lateralstruktur haben.

## Bezugszeichenliste

	1	Halbleiterkörper
	2	erste Elektrode
5	3	zweite Elektrode
	4	pn-Übergang
	5	schwach dotiertes Gebiet
	6	Raumladungszone
	7	stark dotierte Zone
10	8	nn <sup>+</sup> -Übergang
	9, 9'	temporär wirksames Gebiet
	10	Kompensationsgebiet
	11	stationär wirksames Gebiet
	12	Anodenzone
15	13	Ladungsträgerberg
	A	Anode
	K	Kathode
	i <sub>T</sub>	Tailstrom
	E(stat)	statisches elektrisches Feld
20	E(dyn)	dynamisches elektrisches Feld
	N <sub>A</sub>	Akzeptorenkonzentration
	N <sub>D</sub>	Donatorenkonzentration
	w	Weite des schwach dotierten Gebietes

## Patentansprüche

1. Halbleiterbauelement mit einem Halbleiterkörper (1) und wenigstens zwei Elektroden (2, 3), zwischen denen sich im Halbleiterkörper (1) mindestens ein pn-Übergang (4) und ein Spannung aufnehmendes Gebiet (5) des einen Leitungstyps, in welchem sich eine Raumladungszone (6) ausbreitet, wenn an die Elektroden (2, 3) eine den pn-Übergang (4) in dessen Sperrrichtung beaufschlagende Spannung angelegt ist, befinden,
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
- dass in dem Spannung aufnehmenden Gebiet (5) ein temporär wirksamer Bereich (9) des einen Leitungstyps vorgesehen ist, der zwischen seinem Leitungsband (L) und seinem Valenzband (V) Zentren (Z) aufweist, die bei einer Überschwemmung des Spannung aufnehmenden Gebiets (5) freie Ladungsträger einfangen können, sich bei einer Ausbreitung der Raumladungszone (6) aber wieder entladen, so dass der Bereich (9) nur bei einem Abschaltvorgang nach der Überschwemmung mit freien Ladungsträgern zeitweise wirksam ist.
2. Halbleiterbauelement nach Anspruch 1,
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
- dass zwischen dem Spannung aufnehmenden Gebiet (5) und der Elektrode (3) für dieses Gebiet (5) eine höher als dieses Gebiet (5) dotierte Zone (7) vorgesehen ist, und dass der temporär wirksame Bereich (9) vor einem Übergang (8) zu der höher dotierten Zone (7) angeordnet ist.
3. Halbleiterbauelement nach Anspruch 2,
- d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,
- dass die höher dotierte Zone (7) den einen Leitungstyp aufweist.

-20-

4. Halbleiterbauelement nach Anspruch 1 oder 2,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die höher dotierte Zone (7) den anderen, zum einen  
Leitungstyp entgegengesetzten Leitungstyp aufweist.

5

5. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 4,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass der eine Leitungstyp der n-Leitungstyp ist.

10 6. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 5,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die Zentren (Z) K-Zentren sind.

15 7. Halbleiterbauelement nach Anspruch 6,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die K-Zentren aus der Assoziation eines Kohlenstoffatoms  
eines Sauerstoffatoms und zweier Leerstellen (COVV) bestehen.

20 8. Halbleiterbauelement nach Anspruch 6 oder 7,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die K-Zentren (Z) durch Bestrahlung mit  
hochenergetischen Teilchen erzeugt sind.

25 9. Halbleiterbauelement nach Anspruch 8,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die K-Zentren (Z) zusätzlich durch eine an die  
Bestrahlung anschließende Ausheilung bei einer Temperatur  
über 300°C erzeugt werden.

30 10. Halbleiterbauelement nach Anspruch 8 oder 9,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die hochenergetischen Teilchen Protonen oder Helium-  
Kerne sind.

35

-21-

11. Halbleiterbauelement nach Anspruch 8 oder 9,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die hochenergetischen Teilchen Kohlenstoffatome sind,  
die K-Zentren bilden und zum Material des Halbleiterkörpers  
5 (1) beitragen.

12. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 11,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass der temporär wirksame Bereich (9) ein Feldstoppbereich  
10 ist.

13. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 12,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass der temporär wirksame Bereich (9) in einer Tiefe von  
15  $0,75 w_B$  bis  $0,95 w_B$  vom pn-Übergang (4) angeordnet ist, wobei  
 $w_B$  den Abstand zwischen dem pn-Übergang (4) und dem  
gegenüberliegenden Rand (8) des Spannung aufnehmenden  
Gebietes (5) bedeutet.

20 14. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 13,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass der temporär wirksame Bereich (9) eine  
Dotierungskonzentration zwischen  $1 \text{ E } 14 \text{ cm}^{-3}$  und  $5 \text{ E } 15 \text{ cm}^{-3}$   
aufweist.

25 15. Halbleiterbauelement nach Anspruch 14,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die Dotierungskonzentration zwischen  $1 \text{ E } 14 \text{ cm}^{-3}$  und  
 $2 \text{ E } 15 \text{ cm}^{-3}$  liegt.

30 16. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1, 2 und 5  
bis 15,  
d a d u r c h g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass es als Diode, IGBT, Thyristor oder MOSFET ausgeführt  
35 ist.

-22-

17. Halbleiterbauelement nach Anspruch 16,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass im Halbleiterkörper (1) in dem Spannung aufnehmenden  
Gebiet (5) zusätzlich Kompensationsgebiete (10) des anderen  
5 Leitungstyps vorgesehen sind.

18. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 17,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass zusätzlich ein stationärer Feldstoppbereich (11)  
10 vorgesehen ist.

19. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 18,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass zusätzlich zu dem temporär wirksamen Bereich (9)  
15 wenigstens ein weiterer temporär wirksamer Bereich (9')  
vorgesehen ist.

20. Halbleiterbauelement nach Anspruch 19,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
20 dass die temporär wirksamen Bereiche (9, 9') durch  
Mehrfachimplantationen erzeugt sind.

21. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 20,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
25 dass es vertikal strukturiert ist.

22. Halbleiterbauelement nach einem der Ansprüche 1 bis 20,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass es lateral strukturiert ist.

30

23. Verfahren zum Herstellen des Halbleiterbauelementes nach  
einem der Ansprüche 1 bis 22,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass K-Zentren durch Implantation von hochenergetischen  
35 Teilchen in ein schwach dotiertes Gebiet (5) eines  
Halbleiterkörpers (1) eingebracht werden.



-23-

24. Verfahren nach Anspruch 23,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass die K-Zentren (Z) zusätzlich durch an die Bestrahlung  
anschließende Ausheilung bei einer Temperatur über 300°C  
5 erzeugt werden.

25. Verfahren nach Anspruch 23 oder 24,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass als hochenergetische Teilchen Protonen oder Helium-Kerne  
10 vorgesehen werden.

26. Verfahren nach Anspruch 23 oder 24,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
dass als hochenergetische Teilchen Kohlenstoffatome  
15 vorgesehen werden, die K-Zentren bilden und zum Material des  
Halbleiterkörpers (1) beitragen.

27. Verfahren nach Anspruch 24,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
20 dass die Ausheilung bei einer Temperatur über 420°C  
vorgenommen wird.

28. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 27,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
25 dass zur Erzeugung des temporär wirksamen Bereiches (9) eine  
Mehrfachimplantation durchgeführt wird.

29. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 28,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
30 dass die Implantation durch eine Metallfolie durchgeführt  
wird.

30. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 29,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t ,  
35 dass zusätzlich eine Implantation mit Protonen zur Erzeugung  
eines stationären Feldstoppbereiches (11) durchgeführt wird.

-24-

31. Verfahren nach einem der Ansprüche 23 bis 30,  
d a d u r c h        g e k e n n z e i c h n e t,  
dass die Implantation von der Rückseite des Halbleiterkörpers  
aus, d. h. von der dem pn-Übergang 4 gegenüberliegenden  
5 Seite, vorgenommen wird.

1/6

FIG 1A

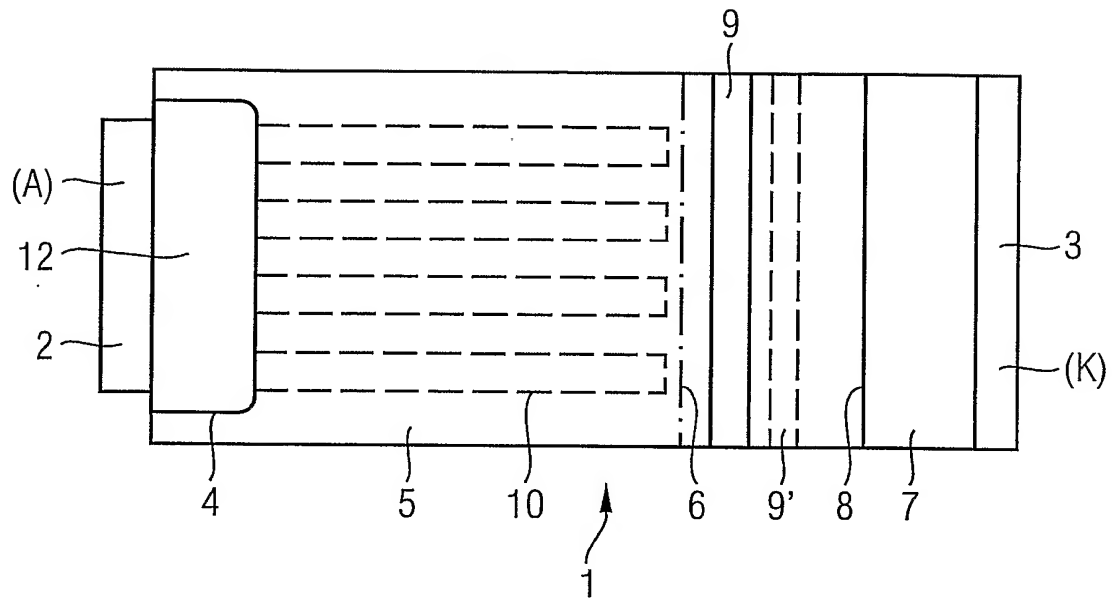
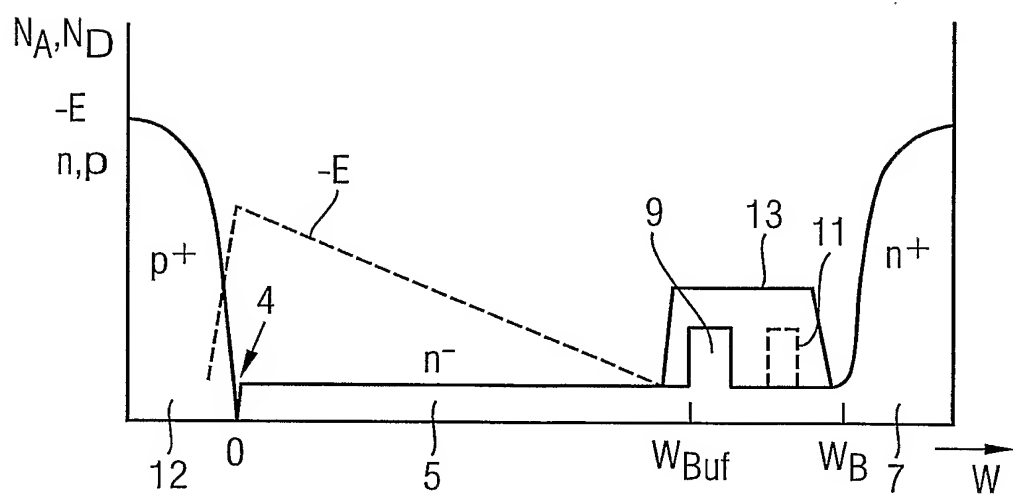


FIG 1B



2/6

FIG 2

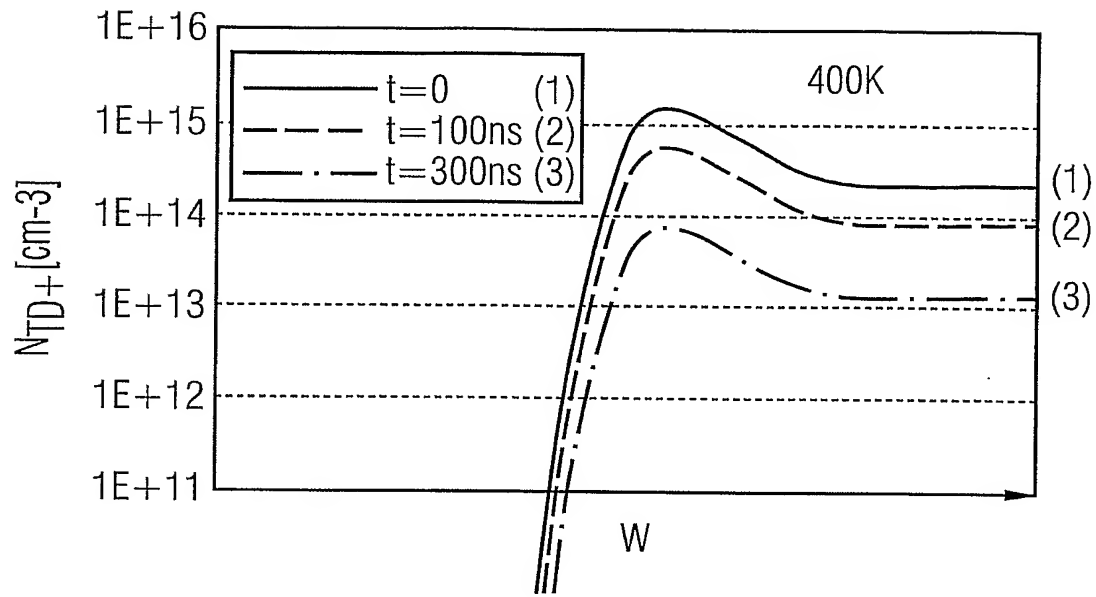
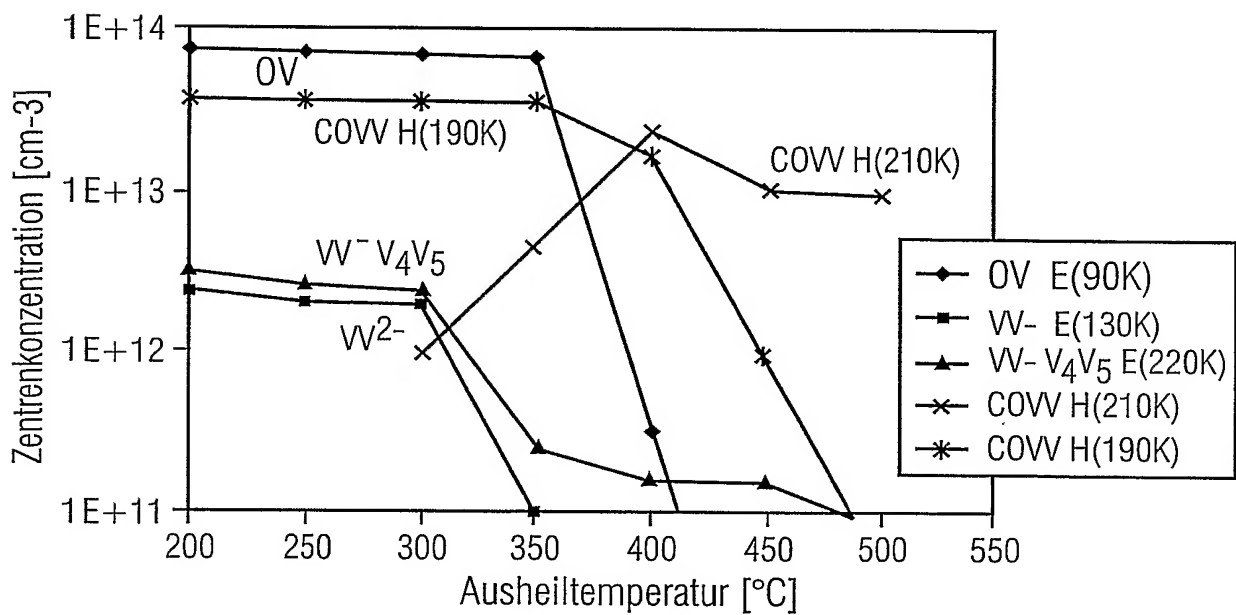


FIG 3



3/6

FIG 4

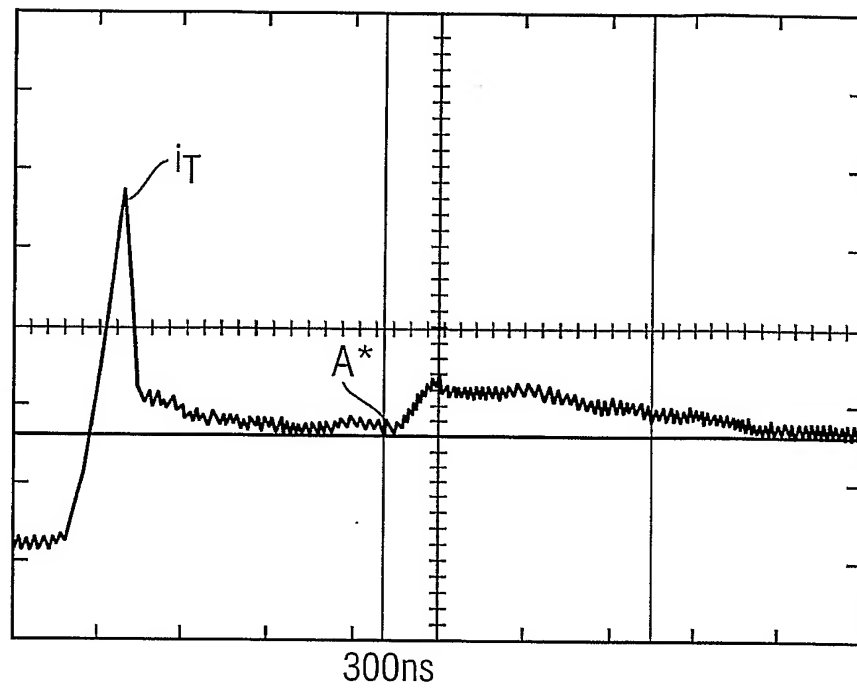
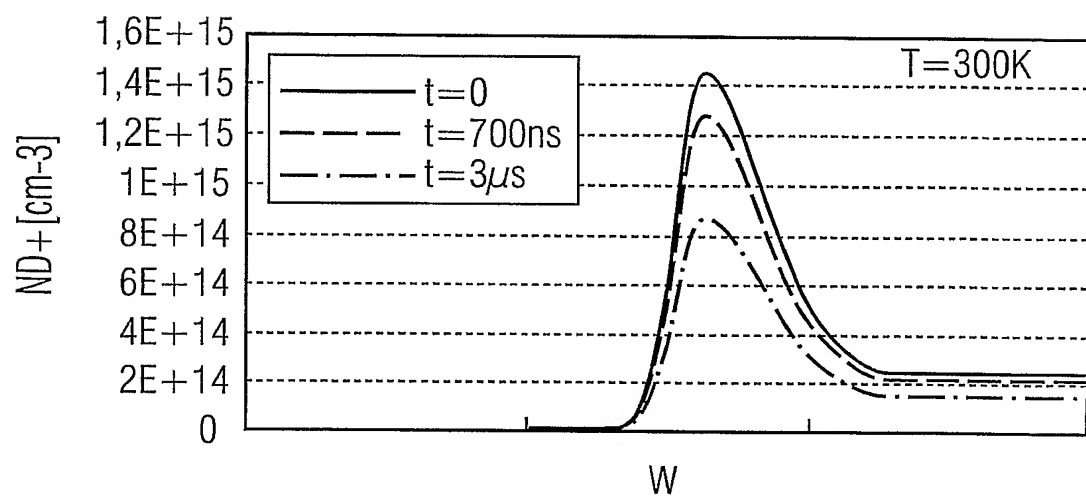


FIG 5



4/6

FIG 6

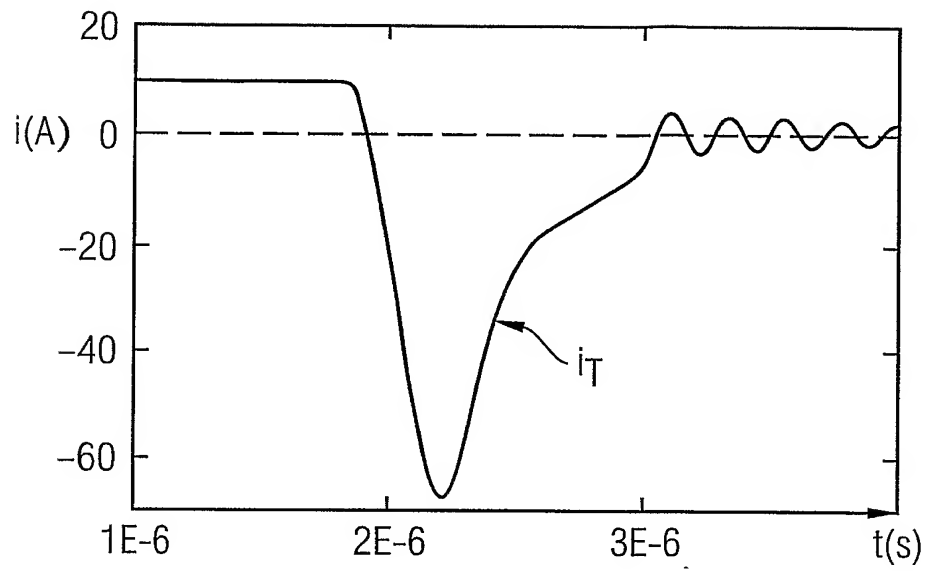
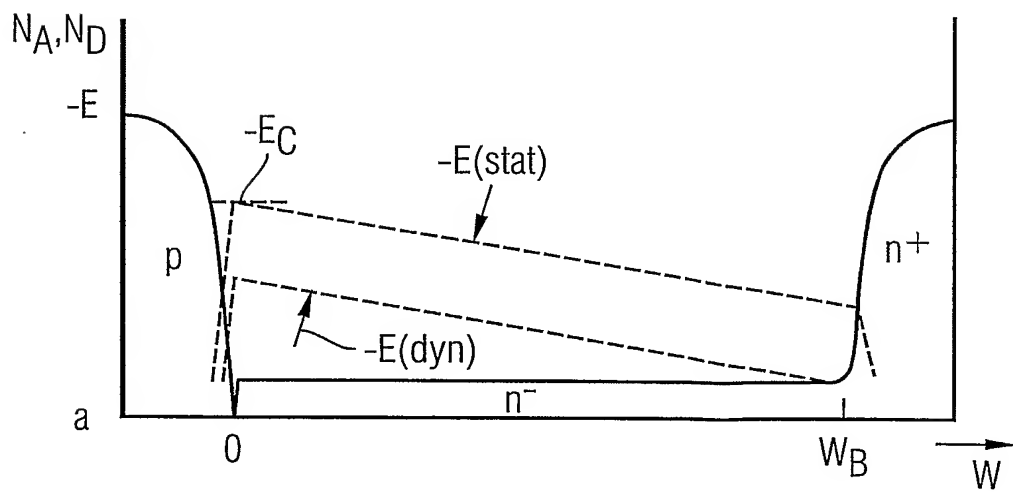


FIG 7A



5/6

FIG 7B

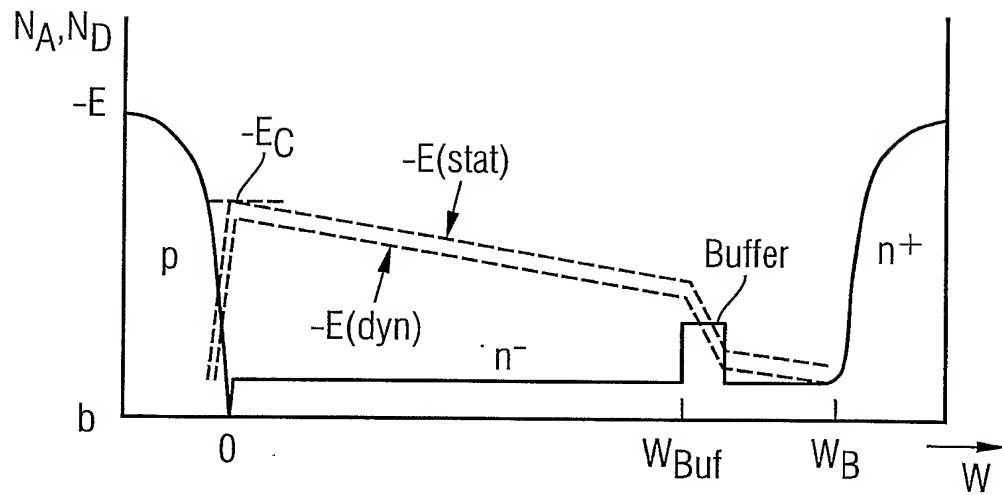
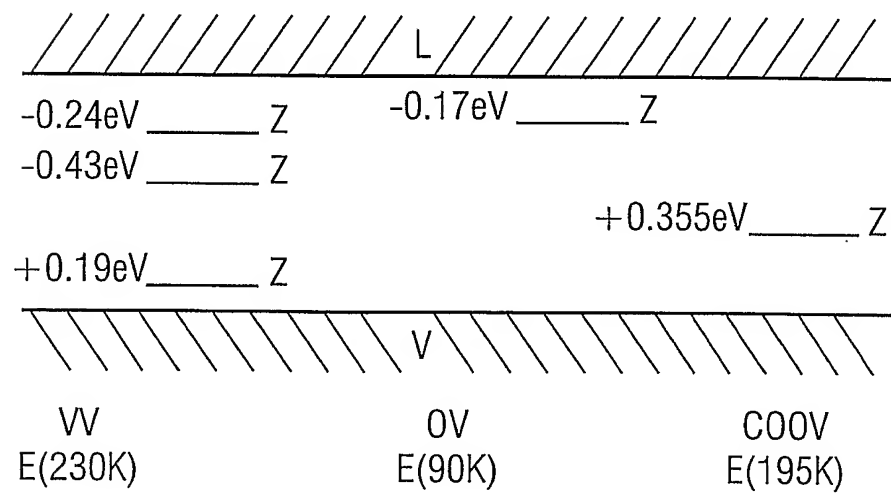


FIG 8



6/6

FIG 9

